محالي

بررسی اثر دینامیک پیشرانه بر رفتار حلقه باز و حلقه بسته یک ربات زیرآبی کنترل از راه دور

مهدی لوئی پور *	استادیار، گروه مهندسی مکانیک-کنترل، پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیردریا، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
مجتبى افشار	کارشناسی ارشد، گروه مهندسی برق-قدرت، پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیردریا، دانشگاه صنعتی اصفهان اصفهان، ایران

#### چکیدہ

در این مقاله، در ابتدا پاسخ دینامیکی یک نوع پیشرانه خاص مورد استفاده در رباتهای زیرآبی کنترل از راه دور توسط تستهای عملی و آزمایشگاهی استخراج شدهاست. بر اساس نتایج حاصل از تستها و تحلیلهای دینامیکی، دینامیکهای غالب و محدودکننده پیشرانه به دو بخش دینامیکهای اشباع و ناحیه مرده تقسیم و در هر مورد مدل دینامیکی مربوطه ارائه شده است. در ادامه اثر دینامیک پیشرانهها در رفتار دینامیکی حلقه باز و حلقه بسته یک ربات زیرآبی مورد بررسی قرار گرفته است. در این بخش، با تعریف سناریوهای مختلف مبتنی بر عملکرد عملیاتی ربات، پاسخ دینامیکی ربات با حالت پیشرانه ایدهآل مقایسه شدهاست. نتایج حاصل از شبیهسازی و تحلیلهای دینامیکی ارایه شده در این مقاله بیانگر این است که دینامیکی ربات با حالت پیشرانه ایده آل مقایسه شدهاست. نتایج حاصل از شبیهسازی و تحلیلهای دینامیکی ارایه شده در این مقاله بیانگر این است که دینامیک اشباع، نیروی تولیدی هر پیشرانه را محدود نموده و به تبع آن سرعت حرکت ربات کاهش یافته و دینامیک رفتار حرکتی ربات کند میگردد. همچنین دینامیکی نامیامی ماده بیا تعری در اجراء فرامین شده و زمان پاسخ دینامیکی ربات افزایش می یابد. علاوه بر آن دقت و سرعت کنترل کنندهها را در فرآیند تثبیت عمق و سمت کاهش می در واژههای کلیدی: ربات زیرآبی کنترل از راه دور، مدل سازی پیشرانه، اثر ناحیه مرده، اثر اشباع، کنترل مقید.

#### Thruster dynamics effects investigation on open loop and close loop behaviors of an Underwater Remotely Operated Vehicle

M. LoueipourResearch Institute for Subsea Science and Technology, Isfahan university of Technology, Isfahan, IranM. AfsharResearch Institute for Subsea Science and Technology, Isfahan university of Technology, Isfahan, Iran

#### Abstract

In this paper, dynamic responses of a specific thruster used in Remotely Operated Vehicles (ROVs) have been extracted through experimental and laboratory tests. Based on the experimental results and dynamic analysis, thruster dominant dynamics have been determined and divided into saturation, and dead-zone effect dynamics. Then, elaborated dynamics have been mathematically modeled to simulate an appropriate dynamic model for thrusters. In the following, the effects of determined dynamics of thrusters have been studied on both open loop and close loop ROV dynamic analysis. Hence, by defining some scenarios based on practical ROV's operations, its dynamic responses have been analyzed under both ideal and proposed thruster model. Simulation results and dynamic analysis elaborate that saturation effect confines generating force of thrusters yielding to decline ROV's speed and decelerates its dynamic behavior response time. In addition, dead-zone effect dynamic causes a delay in the execution of applied commands. Therefore, it provides a gradual increase in dynamic response time of the ROV. Furthermore, it also declines the accuracy of the both depth and head regulators.

Keywords: Remotely Operated Vehicles, Thruster Modeling, Dead zone effect, Saturation effect, Constrained control.

پژوهشگران تحقیقات بسیاری را برای مدل سازی پیشرانههای مورد استفاده در رباتهای زیرآبی کنترل از راه دور انجام دادهاند. این تحقیقات را میتوان به دو روش کلی تقسیم نمود. روش اول مبتنی برانجام تستهای آزمایشگاهی هیدرودینامیکی است. با انجام این تستها، مدل جامعی از دینامیک پیشرانه ارائه میگردد. در این روش باید پارامترهای بسیار زیادی سنجیده شوند که این مساله مستلزم صرف هزینه و استفاده از تجهیزات دقیق آزمایشگاهی است [۳ – ۶]. روش دوم بهرهگیری از روش عددی شناسایی سیستم<sup>۲</sup>است. در این روش با استخراج پاسخ دینامیکی پیشرانه به ورودیهای مشخص و استفاده از روشهای شناسایی سیستم، مدل پیشرانه تعیین میگردد [۷].

فاکتور مهم دیگر در بررسی رفتار حرکتی رباتهای زیرآبی کنترل از راه دور، روش طراحی کنترلکنندهها است. یکی از پرکاربردترین

#### ۱- مقدمه

رباتهای زیرآبی کنترل از راه دور<sup>۱</sup> در سالهای اخیر به عنوان یک وسیله کاربردی با تکنولوژی نوین توجه بسیاری از دانشمندان و محققان را به خود جلب نمودهاست. این رباتها در انجام عملیاتهای مختلف زیرآبی و در کاربردهایی نظیر کاوش و بازرسی لولههای انتقال فرآوردههای نفتی به وفور مورد استفاده قرار می گیرند [۱]. رفتار حرکتی این رباتها نقش مهمی در انجام بهینه این عملیاتها ایفا می کند. پیشرانهها، منبع تولید نیروی محرکه در رباتهای زیرآبی کنترل از راه دور هستند. پیشرانهها، دربسیاری از موارد الکتریکی بوده و دینامیک آنها تاثیر عمدهای در رفتار حرکتی رباتهای کنترل از راه دور دارد [۲]. از اینرو بررسی اثر دینامیک پیشرانهها بر رفتار حرکتی رباتهای زیرآبی کنترل از راه دور امری ضروری به نظر می رسد.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> System identification methods

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Remotely Operated Underwater Vehicles

<sup>&</sup>lt;sup>®</sup> نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: - loueipour@cc.iut.ac.ir تاریخ دریافت: ۹۷/۰۴/۳۰

کنترل کنندهها که به وفور در رباتهای زیرآبی کنترل از راه دور مورد استفاده قرار گرفتهاست، کنترل کننده تناسبی- انتگرال گیر- مشتق گیر است. این کنترل کننده به دلیل پیادهسازی آسان و همچنین عملکرد نسبتا مناسب به عنوان یک گزینه منطقی و مطلوب شناخته میشود [۱۱ و ۱۲]. از دیگر روشهای پر کاربرد کنترلی که در تحقیقات مورد بررسی قرار گرفتهاند میتوان به روش کنترل کننده مود لغزشی [۱۳] و کنترل کننده تطبیقی [۱۴] اشاره نمود.

پژوهشهای اندکی در خصوص بررسی تاثیر دینامیک پیشرانه بر رباتهای زیرآبی کنترل از راه دور انجام گرفته است. در [۱۵] دینامیک پیشرانه توسط یک فیلتر غیرخطی مدل شده و با استفاده از نتایج تست عملی مورد ارزیابی قرار گرفته است. سپس چند نوع کنترلکننده به منظور حداقل نمودن اثر غيرخطى ديناميك پيشرانه استفاده شده و پاسخ دینامیکی ربات تحت این شرایط تحلیل گردیده است. در مدل ارایه شده در این مقاله اثر ناحیه مرده لحاظ نشده است. پژوهشگران در [۱۶] با انجام تستهای عملی تاثیر دینامیک پیشرانهها را بر کنترل کنندههای خطی و غیرخطی بررسی نمودهاند. در این مقاله صرفا اثر اشباع بررسی شده است و نتیجه گیری گردیده که اثر اشباع عملکرد کنترل کنندههایی که بر پایه مدل طراحی می شوند را تضعیف می نماید. همچنین در [۱۷]، با استفاده از منحنیهای نیرو- سیکل وظیفه'، مربوط به یک پیشرانه خاص که توسط شرکت سازنده آن ارائه شدهاست، اثر ناحیه مرده پیشرانه را بر رفتار حلقه بسته ربات زیرآبی کنترل از راه دور بررسی نموده و روشی را به منظور جبران ناحیه مرده ارائه نموده است. در [۱۸] و در ادامه تحقیقات قبلی، سعی در حذف اثر ناحیه مرده و اثر اشباع پیشرانهها در رفتار حلقه باز و حلقه بسته یک ربات زیرآبی از طریق مدیریت افزونگی پیشرانه ها شده است. در [۱۹]، تاثیر خرابی پیشرانه را در رفتار دینامیکی حلقه باز و حلقه بسته ربات زیرآبی کنترل از راه دور بررسی نمودهاند و روشهای توزیع نیرو تولیدی پیشرانهها، در حضور پیشرانه خراب بررسی گردیده است.

در این مقاله، ابتدا پاسخ دینامیکی یک نوع پیشرانه خاص توسط تستهای عملی استخراج شدهاست. بدین منظور تستهای عملی با بهره گیری از تجهیزات آزمایشگاهی در محیط آزمایشگاه هیدرودینامیک بر روی یک پیشرانه با نام تجاری SM7، محصول کمپانی سی آی<sup>۲</sup> انجام شدهاست. نیروی تولیدشده توسط پیشرانه به ازای شرایط مختلف عملیاتی توسط لودسل<sup>۲</sup> اندازه گیری شده است. با تحلیل نتایج حاصل از این تستها، دینامیکهای غالب موجود در پاسخ دینامیکی پیشرانه تعیین شده است. در ادامه مدلی برای بیان دینامیکهای غالب پاسخ دینامیکی پیشرانه شامل اثر اشباع<sup>۴</sup> و اثر ناحیه مرده<sup>۵</sup> آرایه شده است.

در ادامه اثر دینامیک پیشرانهها شامل اثر اشباع و اثر ناحیه مرده در رفتار دینامیکی حلقه باز و حلقه بسته یک ربات زیرآبی کنترل از راه دور مورد بررسی قرار گرفته است. در این بخش، با تعریف سناریوهای مختلف که مبتنی بر عملکرد رباتهای زیرآبی کنترل از راه دور در محیط عملیاتی است، رفتار دینامیکی ربات در مقایسه با حالت پیشرانه

ایدهآل مورد بررسی قرار گرفته است. در بررسی تاثیر دینامیک پیشرانهها بر رفتار دینامیکی حلقه بسته ربات، حلقههای کنترلی عمق، ارتفاع از کف و سمت مورد ارزیابی قرار گرفته است.

این مقاله در ۲ بخش تدوین شده است که در بخش ۲ نحوه ی استخراج دینامیک پیشرانه و نتایج تستهای عملی بیان شده است. در بخش ۳ معادلات حاکم بر حرکت ربات کنترل از راه دور ارائه شده و در بخش ۴ کنترل کنندههای تناسبی- مشتق گیر- انتگرال گیر مورد استفاده در سیستم کنترل عمق، ارتفاع از کف و سمت ربات معرفی شده است. در بخش ۵ سناریوهایی به منظور بررسی اثر دینامیک پیشرانه بر رفتار دینامیکی ربات در انجام عملیاتهای مختلف بیان شدهاست. در بخش ۶ شبیه سازی های عملکرد ربات مبتنی بر سناریوهای مختلف مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته است و در بخش ۲، نتیجه گیری از پژوهش حاضر ارائه گردیده است.

#### ۲- استخراج دینامیک پیشرانه

به منظور استخراج پاسخ دینامیکی پیشرانه، مجموعهای از تستهای عملکردی در محیط آزمایشگاهی انجام گردیده است. این تستها بر روی یک پیشرانه خاص با نام تجاری SM7، محصول کمپانی seaye انجام شده است. این پیشرانه یکی از پرکاربردترین پیشرانهها در رباتهای کنترل از راه دور زیرآبی صنعتی است. متاسفانه به اطلاعات زیادی از منحنیهای عملکردی این پیشرانه در اختیار نیست. پیشرانه از یک موتور جریان مستقیم بدون جاروبک، پروانه و یک جعبه دنده تشکیل شده است. این پیشرانه دارای یک درایور داخلی شامل سیستم کنترل سرعت حلقه بسته است که به ازای گشتاور بارهای متفاوت، سرعت دوران پروانه پیشرانه را ثابت نگه میدارد. مشخصات فنی این پیشرانه در جدول ۱ رائه شده است.

علاوه بر این یک بستر آزمایشی مطابق با شماتیک نمایش داده شده در شکل ۱، به منظور انجام تستهای استخراج پاسخ دینامیکی پیشرانه، پیادهسازی گردیده است. شکلهای ۲ و ۳ تجهیزات مورد استفاده در تستهای آزمایشگاهی عبارتند از: الف: حوضچه کشش با ابعاد ۲/۲\*۳\*۸۰۸ متر ب: ترولی یا ارابه متحرک حوضچه کشش ج: لودسل با ظرفیت ۱۰۰ kg ج: لودسل با ظرفیت ۲۰۰ و من ییشرانه ۲۸۲ و: منبع تغذیه جریان مستقیم ز: منبع تغذیه جریان مستقیم قابل تنظیم ۰ الی ۳۰ ولت ج: سیگنال ژنراتور به منظور تنظیم سیکل وظیفه به منظور استخراج برخی از مشخصههای عملکردی پیشرانه، یک مجموعه

تست طراحی و انجام شدهاست. این تستها در سرعتهای مختلف دوران و در چرخشهای راستگرد و چپگرد پروانه پیشرانه انجام شده است.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Duty cycle

Seaeye

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Load cell

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Saturation effect <sup>5</sup> Dead zone effect

Dead zone effec

۱۸۲

مشخصه	ویژگی
نوع موتور	BLDC
ولتاژ نامى	$\Delta \cdots VDC$
جريان نامي	۵A
نيروى پيشران راستگرد	94 Kg
نیروی پیشران چپگرد	۶۰ Kg
سيگنال كنترل سرعت	PWM , $1 \cdot - 17$ V, $2 \cdot \cdot$ Hz
سيگنال كنترل جهت	rf VDC



شکل ۱- طرحواره بستر آزمایش تست



شکل ۲- حوضچه کشش و ترولی



شکل ۳– سیستم نمونهبردار، منبع تغذیه، پایه نگهدارنده پیشرانه و لودسل

در این پیشرانه، سرعت چرخش پروانه توسط تغییر سیکل وظیفه سیگنال مدولاسیون پهنای باند<sup>۱</sup> اعمالی به پیشرانه تنظیم میگردد. همچنین سیگنال کنترل جهت چرخش پروانه، توسط یک ولتاژ ۲۴ ولت جریان مستقیم تغذیه میشود که با جابجا نمودن قطبهای آن میتوان جهت چرخش را کنترل نمود. نیروی تولید شده توسط

پیشرانه، به ازای سیکل وظیفههای متفاوت سیگنال کنترل سرعت توسط لودسل اندازهگیری شدهاست. به منظور اطمینان از صحت نتایج، تکرارپذیری و کاهش خطای اندازهگیری، تمامی تستها، در سه مرتبه تکرار شده است.

شکل ۴ مقادیر اندازه گیری شده نیروهای تولیدی توسط پیشرانه را به ازای تغییرات سیکل وظیفه از صفر تا صد درصد در چرخش راستگرد پروانه نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود، حداکثر نیروی تولیدی پیشرانه در این حالت معادل ۶۴ لات و حداقل آن به ازای سیکل وظیفهی ۲۰ درصد بوده که معادل ۲ k است. پیشرانه در سیکل وظیفههای کمتر از ۲۰ درصد نیرویی تولید نمی کند. این مساله ناحیه مرده علی رغم وجود فرمان تحریک، نیرویی تولید نمی کند. نیروی ناحیه مرده علی رغم وجود فرمان تحریک، نیرویی تولید نمی کند. نیروی تولیدی پیشرانه به ازای سیکل وظیفههای متفاوت به صورت غیر خطی تنییر کرده است. این مساله موید غیر خطی بودن دینامیک پیشرانه است. همچنین ثابت زمانی پاسخ پیشرانه به ازای سیکل وظیفههای متفاوت در حدود ۲۰ ثانیه است که می توان از این مقدار در مقابل لختی ربات صرفنظر نمود.

شکل ۵ نشاندهنده نیروی اندازهگیری شده پیشرانه به ازای سیکل وظیفه های صفر تا صد درصد در چرخش چپگرد پروانه است. همان گونه که مشاهده می گردد پیشرانه به ازای سیکل وظیفه ۱۰۰ درصد نیروی ۶۰kg و به ازای سیکل وظیفه ۲۰ درصد نیروی ۱/۵ تولید می نماید. همچنین مشابه حالت راستگرد، پیشرانه به ازای سیکل وظیفه های کمتر از ۲۰ درصد وارد ناحیه مرده شده و نیرویی تولید نمی کند. همانند حالت قبل در چرخش چپگرد پیشرانه نیز، با تغییر سیکل وظیفه، نیروی تولیدی یک رفتار غیرخطی داشته است.

شکل ۶ مقادیر اندازه گیری شده حالت پایا<sup>۲</sup> نیروی تولیدی پیشرانه را در دو جهت چرخش راستگرد و چپگرد، به ازای سیکل وظیفههای صفر تا صددرصد نمایش می دهد. به منظور مدل سازی دینامیک پیشرانه، منحنی مشخصه نیرو-سیکل وظیفه نمایش داده شده در شکل ۶ توسط عبارت چند جملهای ارایه شده در رابطه (۱) با روش برازش منحنی با حداکثر خطای ۳٪، مدل سازی گردیده است. (F(D نیروی تولیدی پیشرانه و (P(F) بیانگر درصد سیکل وظیفه است.

$$F(D) = \begin{cases} \sum_{j=0}^{3} a_{j} * D^{j} , \text{if } D \in [-100, -20] \\ 0 , \text{if } D \in [-20, 20] \\ \sum_{j=0}^{3} b_{j} * D^{j} , \text{if } D \in [20, 100] \end{cases}$$
(Y)

با توجه به تستهای عملی، این پیشرانه قابلیت تولید نیرویی معادل با [2,62 Kg] ∪ [2,62 Kg] را دارد. رابطه (۲)، بیانگر معادله مشخصه معکوس نیرو-سیکل وظیفه است.

$$D(F) = \begin{cases} \sum_{j=0}^{3} c_{j} * F^{j} & \text{, if } F \in [-60, -1.5 \text{ Kg}] \\ 0 & \text{, if } F \in [-1.5, 2 \text{ Kg}] \\ \sum_{j=0}^{3} e_{j} * F^{j} & \text{, if } F \in [2, 62 \text{ Kg}] \end{cases}$$
(Y)

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Pulse Width Modulation (PWM)

<sup>2</sup> Steady state



70

شکل ۵- نیرویهای اندازه گیری شده پیشرانه در چرخش چپگرد به



مقادیر ضرایب چندجملهیهای معرفیشده در روابط (۲) و (۳) در جدول ۲ ارایه شده است.

جدول ۲- ضرایب عبارت چند جملهای مرتبه ۳ معادله مشخصه نیرو

پیشرانه				
•	١	٢	٣	j
-17/18	-•/9۵۳۵	-7/8FX*1· <sup>-7</sup>	-1/11 <b>۴</b> %)• <sup>-۴</sup>	$\mathbf{a}_{j}$
۱۳/۹۷	-1/•77	۲/۷۳۵*۱۰ <sup>-۲</sup>	-1/7•V*1• <sup>-*</sup>	$\mathbf{b}_{j}$
-14/98	٣/١٧١	8/808*11	۵/۶۱۲*۱۰ <sup>-۴</sup>	$\mathbf{c}_{j}$
17/18	۳/۳۳۴	-•/•۶٩ <b>*</b> I• <sup>-۲</sup>	۶/• <b>۲</b> ۷ <b></b> *۱۰ <sup>-۴</sup>	ej

بر اساس نتایج حاصله از تستها، منحنی پاسخ دینامیکی پیشرانه را میتوان به سه ناحیه مستقل تفکیک نمود و اثر هر دینامیک را به صورت مجزا در مدل پیشرانه و به تبع آن، در بررسی اثر پیشرانه بر رفتار حرکتی ربات زیرآبی وارد نمود. این سه ناحیه، به صورت سه دینامیک ذیل نامگذاری شده است.

- دینامیک عملکرد فعال
  - دینامیک اشباع
  - دینامیک ناحیه مرده

همانگونه که در منحنی عملکرد پیشرانه (شکل ۶) مشهود است، دو دینامیک اشباع و دینامیک ناحیه مرده، به عنوان دینامیکهای محدودکننده در تولید نیروی پیشرانه ربات خواهند بود و به عنوان دینامیکهای غالب در تاثیرگذاری بر رفتار حرکتی ربات قابل بررسی هستند. در ادامه مدلهایی به منظور اعمال این دو دینامیک به صورت مستقل در دینامیک حرکتی ربات، پیشنهاد شدهاند.

# ۳- معادلات حرکت رباتهای زیر آبی کنترل از راه دور

به منظور بررسی رفتار حرکتی رباتهای زیرآبی کنترل از راه دور، ابتدا معادلات دینامیکی حاکم بر حرکت ربات معرفی می گردد. برای بیان این معادلات، از دو دستگاه مختصات مرجع مطابق با شکل ۷ استفاده می شود. دستگاه مختصات اینرسی (زمین) که متصل به نقطهای از کره زمین (کشتی، سکو، ...) فرض شده و دستگاه متصل به بدنه که متصل به نقطهای دلخواه بر روی وسیله (معمولا مرکز ثقل) فرض می شود. متغیرهای حالت سرعت، (۷)، عموما در دستگاه مختصات متصل به بدنه و متغیرهای حالت موقعیت، (۱)، در دستگاه اینرسی تعریف می شوند. صورت کلی معادله حرکت یک ربات کنترل از راه دور مطابق با رابطه (۳) بیان می گردد [۱۹].

 $M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau$  (۴) که در آن  $M \in \mathbb{R}^{6\times6}$  ماتریس جرم،  $C(v) \in \mathbb{R}^{6\times6}$  ماتریس کوریولیس،  $M \in \mathbb{R}^{6\times6}$  ماتریس میرایی،  $g(\eta) \in \mathbb{R}^{6\times1}$  نیروهای بازگشتی هیدرواستاتیک ربات و  $T \in \mathbb{R}^{6\times1}$  بردار نیروهای پیشران را نشان میدهد. آرایههای هر یک از ماتریسهای فوق در ضمیمه الف تعریف شده است.



شکل ۷- دستگاه مختصات اینرسی و متصل به بدنه

بردار سرعت ربات زیرآبی، (۷)، توسط دو بردار سرعت خطی،(۷۱)، و بردار سرعت زاویهای، (۷2)، مطابق رابطه (۴) بیان میگردد [۲۰].

 $v = [v_1 v_2]^T = [u v w p q r]^T$  (۴) به همین ترتیب بردار موقعیت ربات زیرآبی، (۱)، توسط بردار

موقعیت خطی ربات، (۱٫۱)، و بردار وضعیت ربات، (۱٫۳)، مطابق رابطه (۵) بیان میگردد.

(۵)  $\eta = [\eta_1 \eta_2]^T = [x y z \phi \theta \psi]^T$  (۵) رابطه (۶) به منظور انتقال متغیرهای حالت ربات از دستگاه متصل به بدنه به دستگاه اینرسی استفاده می شود.

 $\dot{\eta}=j(\eta)v$ 

(8)

عناصر ماتریس انتقال از دستگاه متصل به بدنه به دستگاه اینرسی مطابق ماتریس (۷) تعریف می گردند.

$$\mathbf{j}(\eta) = \begin{bmatrix} \mathbf{j}_1(\eta) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{j}_2(\eta) \end{bmatrix} \tag{Y}$$

که  $j_{2}(\eta)$  و  $j_{2}(\eta)$  مطابق رابطه های (۸) و (۹) تعریف می گردند [۲۰].  $j_{1}(\eta)$  مطابق مایند (۹) مطابق  $j_{2}(\eta)$ 

	ιτψισ	$-s\psi c\psi$	+ τψεσεφ	sψsφ + ιψιψs	(1)
=	sψcθ	cψcφ + sφsθsψ		$-c\psi s\phi + s\theta s\phi c\phi$	(//)
	l −sθ	cθ	lsφ	сөсф	
	1]	tθsφ	tθcφ η		
j <sub>2</sub> (	$(\eta) = 0$	cф	−sφ		(٩)
	LO	sφ/cθ	cφ/cθ]		

در این روابط cos, sin و t به ترتیب مخفف cos, sin زوایا هستند. ماتریس  $\tau \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$  به عنوان بردار نیروهای پیشران شناخته میشود. عناصر این بردار در رابطه (۱۰) نشان داده شده است که نیروی لازم برای حرکت ربات زیرآبی را در جهتهای مختلف تعیین مینماید.  $\tau = [X Y Z K M N]^T = T_{conf}F$  (۱۰)

در رابطه (۱۰)، <sup>۳</sup>۵۳ € T<sub>conf</sub> ، ماتریس جانمایی پیشرانهها را در رباتهای زیرآبی کنترل از راه دور نمایش میدهد. همچنین F ∈ ℝ<sup>n×1</sup> بردار نیروی تولیدی پیشرانهها را نشان میدهد که n بیانکننده تعداد پیشرانههای مورد استفاده در ربات زیرآبی است. ماتریس نیروی تولیدی پیشرانهها مطابق با رابطه (۱۱) تعریف میشود.

 $\mathbf{F} = [\mathbf{F}_1 \ \mathbf{F}_2 \ \cdots \ \mathbf{F}_n]^{\mathrm{T}} \tag{11}$ 

مطابق با رابطه (۱۲) نیروی تولیدی هر پیشرانه با استفاده از روش مور-اینورس تعیین میگردد.

 $F = T_{conf}^{T} (T_{conf} \ T_{conf}^{T})^{-1} \tau$  (17)

#### **−۱−۳** دینامیک اشباع

به منظور اعمال دینامیک اشباع هر یک از پیشرانهها در دینامیک حرکت ربات زیرآبی، حداکثر نیروی تولیدی هر پیشرانه در حد اشباع آن محدود می گردد. با توجه به نتایج تستهای عملی، حداکثر نیروی تولیدی هر پیشرانه معادل F به نتایج تستهای عملی، حداکثر نیروی تولیدی هر پیشرانه معادل F به در نظر گرفته شده است. با توجه به ییشرانهها، اعداد ثابت در نظر گرفته شده است، رابطه (۱۳) به منظور اعمال اثر اشباع پیشرانهها در رفتار حرکتی ربات پیشنهاد شده است.  $(F_i(D), if ||F||_{\infty} < F_{sat}$ 

$$F_i(D) = \begin{cases} F_i(D) \\ \frac{|F_i|_{\infty}}{\|F\|_{\infty}} F_{sat} \text{ , otherwise} \end{cases} i = 1, \dots, n \qquad (i = 1, \dots, n)$$

 $\|F\|_{\infty} = \max(|F_1(D)|, \cdots, |F_n|) \qquad (\neg \neg \neg)$ 

 $F_{sat} = 60 \text{ kg}$  (71-5)

در رابطه (۱۳)، ( $F_i(D)$  نیروی تولیدی پیشرانهی i ام ربات بوده که

در رابطه (۱) معرفی شده است. n معرف تعداد پیشرانههای ربات زیرآبی است.

#### ۲-۳- دینامیک ناحیه مرده

مدل پیشنهادی برای اعمال دینامیک ناحیه مرده پیشرانه در دینامیک ربات، مطابق با رابطه (۱۴) است. بر این اساس هرگاه نیروی درخواستی از پیشرانه کمتر از حداقل نیروی تولیدی توسط پیشرانه باشد، نیروی تولیدی پیشرانه معادل با صفر خواهد شد.

$$\begin{split} F_i(D) = \begin{cases} 0 & , F_i < F_{\min} \\ F_i(D) & , \text{otherwise} \end{cases} i = 1, \cdots, n \quad ( \text{image states}) \\ F_{\min} = 2 \text{ kg} & ( , -1 \text{ f}) \end{cases} \end{split}$$

## ۴- سیستم کنترل ربات

پژوهش های بسیاری به منظور طراحی سیستم کنترل رباتهای زیرآبی کنترل از راه دور انجام شده و طیف وسیعی از انواع کنترل کننده ها به این منظور طراحی و ارزیابی شده است[۲]. یک از کاربردترین روش های کنترل، استفاده از کنترل کننده های تناسبی-انتگرال گیر-مشتق گیر است [۲۲ و ۲۳]. در راستای انجام این تحقیق نیز از همین نوع کنترل کننده برای کنترل ربات استفاده شده است. سیستم کنترل ربات از سه حلقه کنترل عمق، کنترل سمت و کنترل میستم کنترل ربات از سه حلقه کنترل عمق، کنترل سمت و کنترل ترانفاع از کف تشکیل شده است. کنترل کننده ی عمق وظیفه تثبیت عمق ربات را نسبت به سطح دریا بر عهده دارد. کنترل کننده ی سمت، تربیت سمت ربات را در انجام عملیات انجام می دهد و تثبیت ارتفاع ربات نسبت به کف دریا نیز توسط کنترل کننده ارتفاع از کف انجام می پذیرد. مقادیر مطلوب عمق، سمت و ارتفاع از کف دریای ربات توسط اپراتور تعیین می گردد. ضرایب طراحی شده برای کنترل کننده های ربات در جدول ۳ ارایه گردیده است.

جدول۳- ضرایب کنترل کنندهها

ضريب مشتق گير	ضريب انتگراگير	ضريب تناسبي	تابع كنترلي
10.	۵۰۰	1	كنترل عمق
10.	۵۰۰	1	كنترل ارتفاع
۲۰۰	۲۰۰۰	1	كنترل سمت

# ۵- سناریوهای تعریف شده در بررسی رفتار دینامیکی ربات

سناریوهایی به منظور بررسی اثر دینامیک پیشرانه بر رفتار حلقه باز و حلقه بسته ربات در نظر گرفته شدهاست. در هر یک از سناریوها، حالت ایدهآل، دینامیک اشباع، و دینامیک ناحیه مرده به صورت مجزا به عنوان مدل پیشرانه در نظر گرفته شدهاند و نتایج حاصل از هر سناریو توسط شبیه سازی مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته است.

شکل ۸، بلوک دیاگرام و نحوه مدلسازی ربات زیرآبی کنترل از راه دور را نشان میدهد . مدلسازی با استفاده از نرمافزار سیمولینک متلب انجام شده است. آرایش و چیدمان در نظر گرفته شده برای پیشرانهها در ربات زیرآبی کنترل از راه دور، در شکل ۹ نمایش داده شدهاست.

همانگونه که مشاهده میگردد در این ربات ۱۰ عدد پیشرانه

وجود دارد که ۲ عدد از پیشرانهها به صورت عمودی و ۸ عدد دیگر به صورت افقی و با زاویه نسبت به محور طولی ربات نصب شدهاند.

Controller Board	ontroller –	Thrust Allocation	Thruster Dynamics	Plant Dynamics	Output
		Compass Pr Sensor S	essure Altimeter ensor Sensor		

شکل ۸– بلوک دیاگرام سیستم کنترل ربات کنترل از راه دور



شکل ۹- جانمایی پیشرانهها در ربات زیر آبی

همچنین در تمام شبیهسازیها، شرایط اولیه موقعیت و سرعت ربات به شرح زیر در نظر گرفتهشده است.

$$\begin{split} \eta &= [\eta_1 \ \eta_2]^T = [200 \ 200 \ 200 \ 0 \ 0 \ 0]^T \\ v &= [v_1 \ v_2]^T = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \end{split}$$

## ۵-۱-۵ سناریوهای حلقه باز

به منظور بررسی عملکرد رفتار حلقه باز، سه سناریو منطبق بر شرایط عملیاتی ربات در نظر گرفته شده است. این سناریوها در زیر توضیح دادهشده است.

## ۵-۱-۱- حرکت رو بهجلو ربات

در این سناریو، نیروی حرکت رو به جلو معادل با X=۴۱۹ kg به ربات اعمال میگردد و دینامیک پیشرانه در سه حالت ایدهآل، با اثر اشباع و با اثر ناحیه مرده در نظر گرفته میشود. اثر هر دینامیک به طور مجزا مورد تحلیل و ارزیابی قرار میگیرد.

## ۵-۱-۲- حرکت عرضی ربات

در این سناریو، ربات در موقعیتی با عرض ۲۰۰ متر نسبت به دستگاه اینرسی قرار گرفته و فرمان حرکت عرضی با نیرویی معادل با Y=۲۹۳ kg به ربات اعمال شده است. در این سناریو نیز، دینامیکهای پیشرانه در سه حالت مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۵-۱-۳- حرکت عمقی ربات

در این سناریو ربات در عمق اولیه ۲۰۰ متر قرار داشته و سپس با اعمال نیرویی معادل با Z=۱۲۸ kg، در راستای محور z شروع به عمق گیری مینماید. در این سناریو نیز، مدل پیشرانه در سه حالت پیشرانه ایدهآل،پیشرانه با اثر اشباع و پیشرانه با اثر ناحیه مرده لحاظ

شده است.

#### ۵-۲- سناریوهای حلقه بسته

به منظور بررسی اثر دینامیکهای پیشرانه بر عملکرد کنترل کنندههای عمق، ارتفاع از کف و کنترل کننده سمت سناریوهایی مبتنی بر شرایط عملیاتی ربات در نظر گرفته شده است. با توجه به یکسان بودن کنترل کننده ارتفاع از کف و کنترل کننده عمق و در نظر نگرفتن دینامیک حسگرها، تنها عملکرد کنترل کننده عمق در شبیه سازیها مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین اثر دینامیکهای پیشرانه بر کنترل کننده سمت نیز به طور مجزا بررسی شده است. در ادامه سناریوهای حلقه بسته ارائه شده است.

## 4-۲-1 تثبیت سمت (ψ)

در این سناریو مطابق با شرایط اولیه، ربات در زاویه صفر درجه بوده و فرمان تثبیت ربات در زاویه  $\psi = 1 \cdot \deg$  به کنترل کننده سمت اعمال شده است و تاثیر دینامیکهای پیشرانه برعملکرد کنترل کننده و رفتار حرکتی ربات بررسی شده است.

## (z) تثبیت عمق ربات (z)

در این سناریو کنترلکننده عمق، ربات را از عمق اولیه ۲۰۰ متر به عمق مطلوب ۲۰۲ متر رسانده و سعی در تثبیت عمق ربات دارد و در این شرایط اثر دینامیکهای پیشرانه بر رفتار کنترلکننده عمق تحت بررسی قرار می گیرد.

# ۶- شبیهسازی و تحلیل نتایج

در این بخش نتایج حاصل از شبیهسازی هر یک از سناریوهای عملیاتی حلقه باز و حلقه بسته به صورت مجزا ارائه شده و مورد تحلیل قرار گرفته است.

# **۶–۱– شبیهسازی سناریوهای حلقه باز**

#### ۶-۱-۱- سناريو اول

شکل ۱۰ نتایج حاصل از شبیه سازی سناریو اول حلقه باز را نمایش می دهد. شکل ۱۰ – الف عملکرد ایده آل پیشرانه ی شماره ۱ را در این سناریو نمایش می دهد. این پیشرانه در حالت ایده آل نیرویی معادل با ۶۲۷۸ تولید کرده است. همانگونه که در شکل ۱۰ –ج مشاهده می شود، در این حالت سرعت خطی رو به جلو ربات ۸۱ /۱۵ خواهد بود. فعال شدن دینامیک اشباع مطابق شکل ۱۰ الف، منجر به محدود شدن نیروی تولیدی پیشرانه در حد اشباع و معادل ۸ ۵۸۸ گردیده است. بر اساس شکل ۱۰ –ج، کاهش نیروی تولیدی پیشرانه، سرعت نهایی ربات نیز به مقدار ۲۹ ۸ ۹۵ش داده است. در این سناریو فرمان به پیشرانه به صورت پلهای فرض شده است و لذا اثر ناحیه مرده مشهود نیست. بدیهی است در صورت افزایش تدریجی فرمان، اثر دینامیک ناحیه مرده پیشرانه، باعث ایجاد تاخیر در پاسخ ربات نسبت به فرمان می گردد.



شکل ۱۰- شبیهسازی سناریو اول حلقهباز (الف) نیروی تولیدی پیشرانه شماره ۱ (ب) موقعیت ربات در راستای محور x (ج) سرعت خطی ربات در راستای محور x

#### ۶-۱-۲ سناریو دوم

شکل ۱۱ نتایج حاصل از شبیه سازی سناریو دوم حلقه باز را نمایش می دهد. همان گونه در شکل ۱۱- الف مشاهده می گردد، پیشرانه شماره ۱ در حالت ایده آل نیرویی معادل با ۶۴۴ تولید کرده است. در این حالت مطابق شکل ۱۱- ج سرعت حرکت جانبی ربات به ۱/Akn رسیده است.

فعال شدن دینامیک اثر اشباع منجر به محدود شدن نیروی تولیدی تراستر در حد اشباع آن معادل با ۸ ۵۸۸ گردیده است (شکل ۱۱- الف). همانگونه که در شکل ۱۱- ب نشان داده شده است دینامیک اشباع باعث میشود تا ربات مسافت کمتری تقریبا معادل با ۵ متر، را نسبت به حالت ایدهآل بپیماید. این مساله به علت محدود شدن سرعت حرکت جانبی ربات به میزان ۱/۲۲ km است (شکل ۱۱- ج). در این سناریو نیز همانند سناریوی اول، اثر دینامیک ناحیه مرده پیشرانه مشهود نیست که در صورت تغییر نوع فرمان، این اثر میتواند باعث ایجاد تاخیر در پاسخ ربات نسبت به فرمان حرکت جانبی گردد.

## ۶-۱-۳- سناریو سوم

نتایج حاصل از شبیه سازی سناریو سوم حلقه باز در شکل ۱۲ نشان داده شده است. شکل ۱۲– الف نیروی تولید شده توسط پیشرانه شماره ۹ را در دو حالت ایده آل و اشباع نمایش می دهد. همان گونه که در شکل ۱۲– ب و ج مشاهده می گردد، ربات در راستای محور z بدون در نظر گرفتن اثر اشباع مسافت تقریبی ۵۰ m ۱ ۵۰ را با سرعت ۱/۴۵ kn طی کرده است. اثر دینامیک اشباع باعث شده تا سرعت ربات در



شکل ۱۱- شبیهسازی سناریو دوم حلقهباز (الف) نیروی تولیدی پیشرانه شماره ۱ (ب) موقعیت ربات در راستای محور y (ج) سرعت خطی ربات در راستای محور y



شکل ۱۲- شبیهسازی سناریو سوم حلقه باز (الف) نیروی تولیدی پیشرانه شماره ۹ (ب) موقعیت ربات در راستای محور z (ج) سرعت خطی ربات در راستای محور z

مهدى لوئى پور و مجتبى افشا

#### ۲-۶- شبیهسازی سناریوهای حلقه بسته

# ۶-۲-۱- سناريو اول

راسی

اثر ديناميک

پیشرانه بر رفتار

حلقه باز و

نتایج حاصل از شبیه سازی سناریو اول حلقه بسته در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همانگونه که در شکلهای ۱۳- الف الی ۱۳- چ مشاهده می گردد، کنترل کننده به منظور کنترل ربات در سمت تعیین شده، فرمانی معادل تولید نیروی ۲۰ ۸ را به پیشرانه شماره ۱ ارسال کرده است. این مقدار نیروی درخواستی از پیشرانه شماره ۱، از حد اشباع کمتر بوده و لذا پیشرانه وارد ناحیه اشباع نمی شود. فعال شدن دینامیک اشباع پیشرانه وابسته به مقدار بهره کنترل کنندهها و همچنین انتخاب نقطه تنظیم مطلوب در شروع حرکت است. به عبارت دیگر، در صورت افزایش بهره کنترل کنندهها و یا اختلاف زاویه سمت مطلوب با زاویه ربات، امکان ورود پیشرانه به حالت اشباع در شروع حرکت ربات وجود خواهد داشت.

شکل ۱۳ –ب، اثر دینامیک ناحیه مرده پیشرانه در رفتار حرکتی حلقه بسته ربات را نشان میدهد. همانگونه که مشاهده میشود، با توجه به اینکه در شروع حرکت، نیروی درخواستی از پیشرانه ۱ (۴۰N) از حداقل نیروی تولیدی پیشرانه (۱۹/۶ ۲) بیشتر است، این دینامیک در ابتدا تاثیر در حرکت ربات نداشته است لیکن در ادامه با نزدیک شدن سمت ربات به زاویه مطلوب، نیروی درخواستی کنترل کننده کاهش یافته و این امر باعث میشود پیشرانه وارد ناحیه مرده گردد. به عبارت دیگر، پیشرانه نیرویی به منظور حذف خطا در بازه زمانی ۶ تا بیشرانه به ناحیه مرده در ثابت ماندن خطای در بازه زمانی مذکور را ۴۸ ثانیه تولید نمی کند ( شکل ۱۳–الف). شکل ۱۳– ج، تاثیر ورود نشان میدهد. به دلیل بکارگیری ترم انتگرال گیر در کنترل کننده، سطح زیر منحنی خطا افزایش یافته و باعث خروج پیشرانه از ناحیه مرده در ثانیه ۴۸ می گردد. بدیهی است که در صورت حذف جمله انتگرال گیر در کنترل کننده، اثر ناحیه مرده باعث عدم حذف خطای انتگرال گیر در کنترل کننده، اثر ناحیه مرده باعث عدم حذف خطای

# ۶-۲-۲ سناريو دوم

نتایج شبیهسازی سناریو دوم حلقه بسته در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همانگونه که در شکل ۱۴- الف مشاهده می گردد، کنترلکننده عمق در لحظه اول نیرویی معادل با ۲۰۰۱ را از پیشرانه شماره ۹ به منظور تثبیت عمق ربات درخواست نموده است. در صورتیکه اثر دینامیک اشباع در مدل پیشرانه وارد گردد، به دلیل فراتر بودن نیروی درخواستی کنترلکننده از حد اشباع در لحظات اولیه، نیروی تولیدی پیشرانه در مقدار ۸ ۸۸ محدود می شود. مطابق شکل ۱۴- ب و شکل ۱۴- ج دینامیک اثر اشباع باعث می شود که زمان رسیدن به عمق مطلوب و کاهش خطای تعقیب عمق افزایش یابد. مهچنین به دلیل این که سطح نیروی درخواستی کنترلکننده نسبت به حداقل نیروی تولیدی پیشرانه بالاتر است، پیشرانه وارد ناحیه مرده نشده و باعث می شود تا در این سناریو دینامیک ناحیه مرده تاثیری بر عملکرد کنترلکننده در شروع حرکت نداشته باشد.

# ۷- نتیجهگیری

در این مقاله اثر دینامیک پیشرانهها بر رفتار حلقه باز و حلقه بسته رباتهای زیرآبی کنترل از راه دور بررسی گردیده است. بدین منظور، با



شکل ۱۳- نتایج شبیهسازی سناریو اول حلقه بسته (الف) نیروی تولیدی پیشرانه شماره ۱ (ب) پاسخ کنترل کننده سمت (ج) خطای کنترل کننده سمت



شکل ۱۴– نتایج شبیهسازی سناریو دوم حلقه بسته (الف) نیروی تولیدی پیشرانه شماره ۹ (ب) پاسخ کنترل کننده عمق (ج) خطای کنترل کننده عمق

استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی، بستر آزمایش مناسبی جهت استخراج پاسخ دینامیکی یک نوع پیشرانه با نام تجاری SM7 فراهم شده و پاسخ دینامیکی پیشرانه به ازای سیکل وظیفههای مختلف اندازهگیری شده است.

همچنین نشان داده شده که اثر اشباع و اثر ناحیه مرده، دینامیکهای محدودکننده موجود در پاسخ دینامیکی پیشرانه هستند. سپس پیشرانه در سه حالت ایدهآل، با در نظر گرفتن دینامیک اثر اشباع و همچنین اثر دینامیک ناحیه مرده به صورت مجزا مدلسازی شده است. اثر هر یک از دینامیکهای پیشرانه مستقلا بر رفتار حلقهباز و حلقه یسته با کنترل کننده های عمق و سمت ربات بررسی شده است.

نتایج شبیه سازی بیانگر این است که اثر اشباع منجر به محدود شدن نیروی تولیدی پیشرانه در حد اشباع می شود که این مساله کند شدن سرعت حرکت ربات را به دنبال دارد. همچنین دینامیک ناحیه مرده باعث کاهش دقت و سرعت کنترلکنندههای عمق و سمت در عمليات تثبيت نهايي عمق و زاويه مطلوب مي شود. علاوه بر آن ديناميك ناحيه مرده مىتواند سبب ايجاد تاخير دراجراى فرامين حرکت ربات شود. از اینرو ضرایب کنترلکننده بایستی به نحوی انتخاب گردد که پیشرانه وارد ناحیه اشباع نشده و بتواند از ناحیه مرده نیز سریعا خارج شود. علاوه بر آن لازم است به منظور جلوگیری از ورود پیشرانه به ناحیه اشباع مسیر مطلوب با شیب ملایم و دارای تغیرات پلهای کوچک طراحی گردد. همچنین در اثر وجود دینامیک ناحیه مرده در پیشرانهها ، بخصوص در کنترل کنندههای تناسبی- مشتق گیر، دقت کنترل کننده ها در عملیات تثبیت عمق و سمت ربات کاهش می یابد و زمان تثبیت ربات افزایش پیدا می کند، لذا لازم است تا از ترم انتگرال گیر به منظور حذف خطای ماندگار در طراحی سیستم کنترل كننده ربات استفاده نمود.

#### ۸- نمادها

r

نیرو در راستای محور N) x)	X
نیرو در راستای محور N) y)	Y
نیرو در راستای محور N) z)	Ζ
ممان حول محور (Nm) x	Κ
ممان حول محور (Nm) y)	Μ
ممان حول محور (Nm) N	Ν
موقعیت وسیله در راستای محور m) x)	x
موقعیت وسیله در راستای محور m) y)	У
موقعیت وسیله در راستای محور m) z)	z
زاویه وسیله حول محور (deg) x	φ
زاویه وسیله حول محور y (deg)	θ
زاویه وسیله حول محور deg) z)	ψ
سرعت خطی در راستای محور m/s) x)	u
سرعت خطی در راستای محور m/s) y)	v
سرعت خطی در راستای محور m/s) z)	w
سرعت زاویهای ربات حول محور deg/s) x)	p
سرعت زاویهای ربات حول محور deg/s) y)	q

سرعت زاویه ای ربات حول محور (deg/s) z)

در این ماتریسها m جرم،  $I_{ij}$  ممانهای اینرسی حول محورهای مختصات و X<sub>u</sub>, Y<sub>v</sub>, Z<sub>w</sub>, K<sub>b</sub>, M<sub>q</sub>, N<sub>r</sub> ضرايب جرم افزوده ربات هستند. همچنین.  $Y_{G}$  ، $X_{G}$  و  $Z_{G}$  فواصل مرکز جرم و  $X_{B}$  ،  $X_{G}$  و Z\_B فواصل مرکز بویانسی ربات تا مبدا مختصات در راستای محورهای مختصات  $X_{u|\dot{u}|}$ و  $N_r$  و  $N_r$  و  $M_q$   $K_p$   $Z_w$   $Y_v$   $X_u$  هستند. و  $N_{r|r|}$  و  $M_{q|q|}$ ،  $K_{p|p|}$ ،  $Z_{w|w|}$ ،  $Y_{v|v|}$ راستای حرکت و دوران حول محورهای مختصات هستند [۲۰].

#### ۹- مراجع

- [1] Capocci R., Dooly G., Omerdić E., Coleman J., Newe T., Toal D., Inspection-Class Remotely Operated Vehicles-A Review. Journal of Marine Science and Engineering. Vol. 5, No. 1, pp. 13, 2017.
- [2] Ralph B., Whitcomb L., Grosenbaugh M., An accurate fourquadrant nonlinear dynamical model for marine thrusters: Theory and experimental validation, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 25, No. 1, pp. 146-159, 2000.
- [3] Jinhyun K., Chung W. K., Accurate and practical thruster modeling for underwater vehicles, Journal of Ocean Engineering, Vol. 33, No. 5, pp. 566-586, 2006.
- [4] Jinhyun K., Jonghui H., W., Chung W. K., Accurate thruster modeling with non-parallel ambient flow for underwater vehicles, In International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 978-983, 2005.
- [5] Boehm J., Berkenpas E., Henning B., Rodriguez M., Shepard C., Turchik A., Characterization, Modeling, and Simulation of an ROV Thruster using a Six Degree-of-Freedom Load Cell, In OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston, 2018.

مهدى لوئى پور و مجتبى فثا

- [6] Faris Ali A., Rizal Arshad M., Seabotix Thruster Modeling for a Remotely Operated Vehicle (ROV), In 10th International Conference on Robotics, Vision, Signal Processing and Power Applications, pp 465-471, 2019.
- [7] Alkan B., Thrust control design for unmanned marine vehicles, MSc Thesis, university of İzmir Institute of Technology, 2012.
- [8] Mokhtar M., et al, Model identification and control analysis for underwater thruster system, *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, Vol. 42, No. 8, pp. 992-998, 2013.
- [9] Mohd Aras, S. M., et al, Thruster modeling for underwater vehicle using system identification method. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 10, No. 5, pp. 252, 2013.
- [10] Sangrok J., et al, Empirical modeling of rotating thruster for underwater robotic platform, *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 20, No. 1, pp. 118-126, 2015.
- [11] Kashefi M. H., Bolouri F., Bolouri K., Path Planning and Open-loop Control Algorithms for a Differential Thrust Autonomous Underwater Vehicle, *IOSR Journal of Electrical* and Electronics Engineering, Vol. 11, Issue 4, PP 151-158; 2017.

[17] لوئی پور م، دانش م.، کشمیری م.، مجیری م.، طراحی سیستم کنترل

- [13] Smallwood D., Whitcomb L., Model-based dynamic positioning of underwater robotic vehicles: theory and experiment, *IEEE Journal of Oceanic Engineering* Vol. 29, No. 1, pp. 169-186, 2004.
- [14] Hsu L., Costa R., Lizarralde F., Dynamic positioning of remotely operated underwater vehicles. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 7, No. 3, pp. 21-31, 2000.
- [15] Yoerger R., Cooke G., Slotine J., The influence of thruster dynamics on underwater vehicle behavior and their incorporation into control system design, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 167-178, 1990.
- [16] Smallwood D., Whitcomb L., The effect of model accuracy and thruster saturation on tracking performance of model based controllers for underwater robotic vehicles: experimental results. *Robotics and Automation*, *Proceedings. ICRA'02*, Vol. 2, pp. 1081-1087, 2002.
- [17] Ropars B., et al. Thruster's dead-zones compensation for the actuation system of an underwater vehicle. *Control Conference (ECC), 2015 European*, pp. 741-746, 2015.
- [18] Ropars B., et al., Redundant actuation system of an underwater vehicle, *Ocean Engineering*, VOL. 151, pp. 276–289, 2018.
- [19] Afshar M., Loueipour M., A Study on Thrusters' Failure Effects on Open loop and Close loop Behaviors of Remotely Operated Vehicles (ROVs). *The 19th marine industries conference (MIC2017)*;2017
- [20] Fossen T., Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control, pp. 109-134, John Wiley & Sons, 2011
- [21] T.SNAME, Nomenclature for treating the motion of a submerged body through a fluid. *The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Technical and Research Bulletin*, pp.1-5, 1950.
- [22] Maalouf D., Creuze V., A Chemori, IT Tamanaja, Mercado EC,. Real-time experimental comparison of two depth control schemes for underwater vehicles. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. Vol. 12, pp. 13, 2015.

[23] Abidin A. Z., Mardiyanto R., Purwanto D., Implementation of PID controller for hold altitude control in underwater remotely operated vehicle, *Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)*, pp. 665-670, 2016.